

## クランプオン形超音波流動計に関する研究

著者	茂木 良平
号	1420
発行年	1993
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/10227">http://hdl.handle.net/10097/10227</a>

氏 名 茂 木 良 平

授 与 学 位 博 士 ( 工 学 )

学位授与年月日 平成 5 年 10 月 13 日

学位授与の根拠法規 学位規則第 5 条第 2 項

最 終 学 歴 昭 和 45 年 3 月

東北大学工学部精密工学科卒業

学 位 論 文 題 目 クランプオン形超音波流量計に関する研究

論 文 審 査 委 員 東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学教授 山之内和彦

東北大学教授 中村 僖良

## 論 文 内 容 要 旨

### 1. 歴史的背景と本論文の目的

探触子を管壁の外に取り付けるクランプオン形超音波流量計は、取付の簡便さ、流体圧力の無損失及び大口径管における経済性等の長所の為に広く普及したが、固有の問題もありこれまで研究が続けられてきた。

〈測定方式の研究〉 管内の流量を超音波の伝搬速度変化から測定する研究は、1950 年代から本格的に取り組まれた。超音波流量計で測定される時間差は非常に小さく、1950～60 年代にはこの時間差を直接カウンタで測定することは回路技術的に困難だった。そこで、位相差で測定する方式の研究が多かったが、位相差法は測定可能最大流速を低下させるという問題を抱えていた。一方、シングアランド法等の周波数を精密に高安定に測定する技術の研究が進んでいたので、これが超音波流量計に採用され実用化した。1970 年代末に、高周波で高安定のクロックを用い、マイクロプロセッサで統計処理を行うことで時間分解能を高くした時間差法が開発され、現在では、大多数の超音波流量計が時間差法によっている。

〈音波伝搬経路の研究〉 クランプオン形と非クランプオン形との違いは音波伝搬経路中に管壁が存在するか否かである。非クランプオン形の放射角は幾何学的に決定されるが、クランプオン形の場合には超音波がプリズムと管壁を伝搬するので、プリズムと流体の音速の温度依存性により放射角は変化し、超音波の伝搬時間も変化する。そこで、スネルの屈折の法則と点音源モデル（レイセオリ）の考え方を基にして温度による放射角の変化を推定することで温度補償する方式が開発されたが、精度的に不十分なものであった。1980 年代中頃から、筆者等は管壁に発生する漏洩弾性

波の研究を行ない、漏洩弾性波が音波伝搬経路に影響を及ぼすことを指摘し、この影響を低減したワイドビーム法を提案し、プリズム音速を測定する機能を併用することで音波伝搬経路を正確に決定できる方法を開発して、この問題を解決した。本論文はこれらの研究を中心に構成したものである。

〈流速分布の補正〉 超音波流量計で測定される流速は測線上の平均となるが、流量を求めるには面平均流速が必要となり、これを変換するための流速分布補正係数が提案されたが、これは滑らかな管と十分発達した軸対称流れを仮定しており、必ずしも実態に即していない。そのため、クランプオン形の超音波流量計にとって流速分布の補正は未だに重要な課題である。

〈本論文の目的〉 本論文は、液体用クランプオン形超音波流量計に対して以下のことを目的とする。①音波伝搬経路の正確な決定法を提案する。②流体音速の温度依存性を補償する方法を提案する。③管壁を伝搬する漏洩弾性波の最適な利用方法を提案する。④前記各項で提案された方法について実験でその妥当性を確認する。

## 2. クランプオン形超音波流量計の測定原理と測定精度に影響を与える要因

〈測定原理〉 流体の流速は、上流側の振動子から送信された超音波が下流側の振動子に受信されるまでの伝搬時間 $t_d$ と、逆に下流側の振動子から上流側の振動子に伝搬する時間 $t_u$ との差に比例する。その比例係数の一部である流体の音速は $t_u$ と $t_d$ の和を用いて表される。流量は流速分布補正係数と管内断面積を流速に掛けることで求まる。

〈測定精度に影響を与える要因〉 測定精度に影響を与える受信信号の $S/N$ とは、測定すべき受信信号とそれに重畳している雑音との比である。雑音の主なものは液体中を伝搬せずに、管壁を伝わってきて直接受信された波等の尾曳きに当たる部分である。受信信号の $S/N$ に起因する流速測定誤差は最大で $S/N$ の数値通りになる。

これまでの代表的な音波伝搬経路の決定方法は点音源モデル（レイセオリ）による方法である。振動子の中心に音波の送受する点（以下音源と言う）を定め、各媒体の音速や各屈折角を変化させてスネルの法則に基づいて算出される伝搬時間と測定値が一致する条件を見つけるものであるが、以下に述べるように、無条件にスネルの法則を用いることは理論的に正しくなかった。

## 3. 音波伝搬経路の空間周波数領域における理論検討

〈理論解析〉 管の口径に比して超音波の波長および管壁の厚さが十分小さく超音波パルスも短いので、管壁を平板と近似し、固体中から入射させた超音波が板を通過して液体へ透過する問題を、フーリエ光学の方法を応用して空間周波数領域で理論的に定式化し検討した。この方法は空間周波数領域で扱うので、入射角と放射角の関係に対して良い見通しを与える。

板の存在の影響を調べるために、超音波が板を透過する際のプリズムー液体薄層ー板ー液体という層状構造を、Olinerの等価回路を組み合わせて回路網で表現し、板の透過率を計算した。その結果、入射波の条件が板波モードの励振条件に近いときには透過率が高く、遠いときには低いので、板がフィルター的な効果を有し、エネルギー中心で代表される音線については、入射角と放射角と

に必ずしもスネルの法則を適用できないことが分かった。

〈励振効率分布図の提案〉 音波伝搬経路を正確に決定できる超音波入射条件を見出すために、入射エネルギーと透過エネルギーの比で定まる励振効率を定義し、励振効率分布図を作成し設計手段として提案した。これは、入射角、ビーム幅及び周波数等の入射波の条件を一定にして、縦軸が放射角、横軸が周波数定数の座標上に、励振効率を円の直径とし、透過超音波の粒子速度がピークとなる放射角と板厚で決まる点を円の中心としてプロットしたものであり、超音波の入射条件と板厚に対して、放射角の偏移量と励振効率を同時に定量的に判断できる。

〈放射角の安定な入射条件〉 実用上は、1個の探触子を広い板厚範囲にわたって使用できるのが望ましい。そこで、励振効率分布図を用いて種々の入射条件を検討した結果、有望と考えられる条件を3通り見いだした。

- (a) ワイドビーム法 入射超音波のビーム幅が広く、モードとモードの中間に入射させて板波モードの影響を避けたことに特徴があり、広い周波数定数範囲にわたって放射角がスネルの法則で予想した角度に一致している。
- (b) 漏洩表面波法 周波数定数の大きい領域で表面波を用いることで、非常に広い範囲にわたって放射角一定の領域を達成できる。
- (c) 漏洩板波法 入射超音波のビーム幅が狭く、放射角が周波数定数に依存し板波モードに沿って変化するが、分散特性から予測できる。

#### 4. 漏洩弾性波を利用した超音波流量計

〈液体音速および流速の測定原理〉 2つの探触子を十分離して取り付け、管壁に漏洩弾性波が励振される条件にして、一方の振動子で超音波を発信させ他方の振動子で受信すると、管内の液体中を複数行程伝搬した超音波がパルス列として観測される。

管壁を伝搬する漏洩弾性波の群速度は予め求められ、位相速度もこれらのパルス列の時間間隔と液体音速を用いて予め測定できる。また漏洩弾性波の群速度と位相速度の温度依存性は小さいので、流量測定中に温度変化があっても液体音速はパルス列の時間間隔から求められることを示した。

液体の流速は、上流側の振動子で発生された超音波が下流側の振動子で受信されるまでの伝搬時間と逆に下流側の振動子で発生された超音波が上流側の振動子で受信されるまでの伝搬時間を用いて、従来と同様に求まる。

〈実験結果および考察〉 漏洩表面波用の探触子での受信信号のS/Nは良好だったものの複数の信号が重なり複雑な包絡線となっており、漏洩板波用の探触子では非常に劣っていた。管内の液体音速の測定結果は文献等によるデータと良く一致しており、本方法で精度良く管内の液体の音速を測定できることを確認できた。漏洩表面波用探触子を用いた流量測定では±2%程度の測定精度が得られ、流量測定可能な事を確認できた。

#### 5. ワイドビームを利用した超音波流量計

〈音波伝搬経路の新しい決定法と測定原理式の導出〉 ここでは、励振効率分布図を用いて板波

モードの影響を受けない範囲の周波数定数を選択し入射角と放射角に対してスネルの法則の適用性を確保し、さらにプリズムの形状を等脚台形とし音速を測定する。ワイドビームを用い平行ビームを仮定できるので入射角はプリズムの形状で決まる。この考え方にしただけで、伝搬時間  $t_0$  と  $t_1$  を用いて流速を求める原理式を導出した。この式に現れる変数は全て精度の高い値であり信頼度は非常に高く、変動要素の多い固定遅延時間の項も無い。また、ワイドビーム法の適用範囲を見積もって示した。

＜実験結果および考察＞ 受信信号の  $S/N$  は良好なものが得られた。点音源モデルとワイドビームモデルの2つのモデルで音波伝搬経路の変化をどれだけ正確に予測できるのかを実験で比較し、ワイドビームモデルの方がよりよい予測となっている事を確認できた。また、流量測定精度の実験結果は、予想通りの精度が得られ、本方式が高精度であると同時に、励振効率分布図を用いた設計法が有効である事も確認できた。さらに、約  $280^{\circ}\text{C}$  の高温高圧水に対して行った流量測定実験でも良好な測定精度が得られたので、目的としていた音速の自動補償性能も認められた。

## 6. 結 論

本研究は液体用クランプオン形超音波流量計に対して行い、特に流量測定精度に影響を与える音波伝搬経路の決定方法、音速の温度依存性の補償方法等に着眼して進めた。本論文で得られた結論は、次のようにまとめられる。

- (1) 管壁が及ぼす影響を、空間周波数領域で理論的に検討し明らかにした。
- (2) 放射角のズレの程度を予測できる励振効率分布図を用いた設計法を提案し、音波伝搬経路を正確に決定できる方法を3通り見いだした。
- (3) ワイドビームを用いた方法について測定原理式を導き、音波伝搬経路が正確に決定され、精度の良い測定ができると同時に液体音速の温度補償を自動的に行うものであることを実験で確認した。
- (4) 漏洩弾性波を利用して液体音速および流速を測定する方法を示し、良好な測定ができることを実験で確認した。

＜今後の課題＞ 本研究では扱わなかった流速分布の補正方法の問題は今後の課題として残されており、今後とも、この問題の研究を続けたい。

## 審 査 結 果 の 要 旨

水道管などの管内を流れる流体の流量を測定するのに超音波流量計が用いられている。特に、超音波センサを管の外壁に固定する方式のクランプオン形は取扱いや保守の面での便利さから、広く用いられているが、この方式には温度変化により伝搬経路にずれが生じ、経路長の測定に誤差が生じるという問題がある。本論文は、この誤差が従来は考慮されていなかった管壁を伝わる弾性波の影響によるものであることを見出し、新しい考案にもとづいたクランプオン形超音波流量計を開発したもので、全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、クランプオン形超音波流量計の測定原理を述べ、その測定精度に及ぼす要因を明らかにし、とくにクランプオン形においては、液体中を伝搬してきた超音波信号に管壁を伝わってきた弾性波信号が重畳して受信信号のS/Nを低下させ、この現象がこれまでの単純な音線理論による音波伝搬経路長決定法における誤差の原因となることを、実験と理論で明らかにしている。

第3章では、音波伝搬経路の解析に空間周波数解析法を取り入れて理論的に検討している。入射条件が板波モードの励振条件に近いほど透過率が高くなり、管壁がフィルタ的效果を示し、このときに音波伝搬経路のシフトが生じることを見出した。さらに、入射エネルギーと透過エネルギーの比で定まる励振効率を定義し、超音波の入射条件と板厚に対して、放射角の偏移量と励振効率を同時に定量的に判断できる励振効率分布図を作成し、新しい設計手法を示した。この励振効率分布図を用いて種々の入射条件を検討して、漏洩表面波法、漏洩板波法、および、ワイドビーム法の3つの方式が有望であることを明らかにした。これは新しい知見である。

第4章では、一對の超音波振動子を管壁に取り付け漏洩弾性波パルスを液体中に放射し、複数行程伝搬後に受波振動子で観測する受波パルス信号の間隔から流速および液体音速を測定する漏洩弾性波法について述べている。具体的に漏洩表面波および漏洩板波を利用した流量計の構成を提案し、流速および液体音速の測定原理式を導出している。これらの漏洩弾性波の群速度と位相速度の温度依存性は小さいので、測定中に温度変化があっても液体音速を精度よく測定できることを、理論および実験により示している。

第5章では、ワイドビーム法による流量計の設計法とその特徴を述べている。従来の点音源モデルによる方法に対してこのワイドビーム法が音波伝搬経路長をより正確に測定できることを実験で定量的に示し、本提案の流量計が従来法より良い精度が得られることを明らかにしている。これは有用な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに、本論文はクランプオン形超音波流量計の精度の向上をめざして、空間周波数解析法により解析を進め新しい流量計を開発したもので、通信工学および計測工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。